

航空レーザ測量成果を用いたダム流域における積雪 深分布の把握

その他（別言語等） のタイトル	GRASP OF THE SNOW DEPTH DISTRIBUTION IN THE DAM BASIN USING THE AIRBORNE LASER SCANNING
著者	鳥谷部 寿人，中津川 誠，石谷 隆始，菊地 渉，山 下 彰司，清治 真人
雑誌名	水工学論文集
巻	54
ページ	427-432
発行年	2010-02
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009748

航空レーザ測量成果を用いたダム流域における 積雪深分布の把握

GRASP OF THE SNOW DEPTH DISTRIBUTION IN THE DAM BASIN USING
THE AIRBORNE LASER SCANNING

鳥谷部寿人¹・中津川誠²・石谷隆始³・菊地渉⁴・山下彰司¹・清治真人⁵
Toshihito TOYABE, Makoto NAKATSUGAWA, Takashi ISHIYA, Wataru KIKUCHI,
Shoji YAMASHITA and Masato SEIJI

¹非会員（独）土木研究所寒地土木研究所寒地技術推進室（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

²正会員 工博 室蘭工業大学大学院工学研究科くらし環境系領域（〒050-8585 室蘭市水元町27-1）

³非会員（独）土木研究所寒地土木研究所寒地技術推進室（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

⁴正会員（独）土木研究所寒地土木研究所寒地技術推進室（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

⁵正会員 財団法人建設物価調査会（〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町11番8号ジースタービル日本橋）

To clarify the estimation error of snow depth spatial distribution with different DEM mesh sizes, airborne laser scanning during two periods (ground surface exposure and snow peak) and a snow depth survey were conducted in the Jozankei Dam catchment area, in the Hokkaido, region of northern Japan. The results of these two investigations were compared for adequate evaluation of the method to determine the spatial distribution of snow depth.

Our regression analysis for different topographic parameters of snow depth showed that the 50-m mesh provided a better fit, while the conformity of the 5-m mesh was poor. In addition, the snow water equivalent with the 50-m mesh demonstrated good compatibility with the results of the snow survey, while the outcome for the 5-m mesh indicated that improvements are needed.

Key Words : Snow depth distribution, Laser scanner, Remote sensing, Snow water equivalent

1. はじめに

北海道の山間地域は半年近く積雪に覆われており、年間の総降水量に占める降雪の割合は非常に高い。雪は時として交通障害などを引き起こし我々の生活を脅かしたりするが、水資源管理の上では重要な役割を担っている。すなわち、雪は雨と異なり降った後もすぐには流出せず、冬期間山間地域に蓄積した後、春の気温上昇に伴って融解して流出してくることから、降水量の変動を相殺し安定した水の供給源となり得る。このように長期的にみると安定した水資源といえるが、近年話題となっている温暖化などの影響により融雪時に降雨が伴うと融雪災害を引き起こす要因ともなる。

このような状況を踏まえ、積雪寒冷地域における山間地域の積雪分布を正確に評価することは水資源の適切な管理、融雪災害の防災計画に寄与するところも大きいと考える。

山間地域における積雪分布の評価に関する研究は、これまで様々な手法で行われてきた。最も一般的で古くか

ら行われているのは、直接積雪量を計測するスノーサーベイによる方法である。アメリカでは1900年代初頭から行われており、Stanley¹⁾は積雪相当水量と河川の季節総流量との相関図を作成し、季節総流量の予測に用いている。日本では1948年に北海道庁²⁾が石狩川水系忠別川で最初の調査を行っている。その後、水力発電による電源開発に伴って積雪地域で盛んに行われるようになった。北海道開発局^{3,4)}においても多目的ダムの建設に伴い、1974年、1975年に石狩川水系芦別川および幾春別川で調査が行われ、積雪相当水量と地形要因の関係をメッシュ情報に整理し、流域の全積雪相当水量を算定している。1978年に北海道大学低温科学研究所^{5,6)}でも大雪山旭岳や手稲山などで調査が行われ気象要因との関係について整理されている。山田ら⁵⁾によると積雪相当水量は高度とともに増加し、融雪が進むとその高度差が助長され、全山融雪状態となると積雪相当水量の傾きも一定となることが示されている。さらに森林限界を境に、積雪相当水量の高度分布が異なることも示されている。松山ら⁷⁾は国内の山岳地域で行われたスノーサーベイによる研究成

果をとりまとめ、高度による積雪相当水量の増加率について整理している。これらの知見は今日の積雪相当水量を推定するうえでも用いられている。

一方、山岳地帯で広範囲のスノーサーベイを実施することは厳冬期の調査であり多大な労力を要し危険を伴うことから、物理的に困難である。故に、得られるデータは限られている。そこで、リモートセンシング技術を活用した調査手法も開発されてきた。航空機による測量技術の進展に伴い1963年の北陸豪雪を契機として航空写真を利用する方法が提案されている。丸安ら⁸⁾は黒部川流域において無雪時と最多雪時の航空写真から標高差を読み取り、積雪深を推定し最大積雪相当水量を求めている。近年、航空レーザ測量の進展に伴い、無積雪時と積雪時の二時期のDEMデータを使って積雪深を求める手法が開発されている。Hopkinsonら⁹⁾は森林地帯で取得したDEMと積雪深の横断測量との比較を行い、岡本ら¹⁰⁾は山地斜面で取得したDEMと現地のGPS観測および超音波積雪深計で計測した結果との比較において、それぞれ高い精度の観測が可能であることを示している。

1972年にはアメリカが地球資源探査・環境監視を目的としたLANDSATの打ち上げに成功し、人工衛星を活用した気象観測の時代が到来した。日本では1981年に武田ら¹¹⁾が只見川上流域においてLANDSATの画像データから融雪前後の雪線（無雪域と積雪域の境界）を求め、この違いから融雪面積を読み取り、気温データより推定した融雪量から積雪相当水量を算定している。

しかしLANDSATのセンサーの観測周波数は雲の影響を受けやすいという弱点があり、得られる情報としては積雪面積情報のみという課題がある。航空レーザ測量を基にした積雪深の観測についてはHopkinsonら⁹⁾岡本ら¹⁰⁾の報告があるが、ダム流域における積雪深の空間分布を把握する上で、流域全体に詳細な航空レーザ測量を適用するのは実際上難しい。

本研究はダム流域の一部に航空レーザ測量を適用して得られた詳細なメッシュサイズのDEMデータを分析して積雪深と地形因子の関係を導き、その関係からダム流域全体の積雪深の空間分布並びに積雪相当水量を推定するものである。本論では航空レーザ測量の精度を検証するとともに、メッシュサイズの違いによる推定精度について考察した結果を報告する。

2. 調査方法

(1) 航空レーザ測量の仕様

航空レーザ測量とは、レーザスキャナ、GPS、IMU（慣性計測装置）を搭載し直接的に地形計測を行うものである。計画されたコース上でレーザを1秒間に25,000回発射し、航空機から地上までの距離を計測する。樹林密度が著しく密でなければレーザの一部が地上に達するため、森林地帯においても地表面形状を計測可能で

表-1 航空レーザスキャナの計測仕様

項目	仕様
レーザ発射回数	25,000Hz
スキャン回数 n	$a \times n < 580$
スキャン角度(半角) a	$0 \sim \pm 20^\circ$
スキャン形状	三角
受信パルスモード	First、Last 同時
ビーム拡散度	0.2 or 1.0 mrad
高さ精度	$\pm 0.15\text{m}$
座標精度	対地高度の1/2000
照射角度精度	0.005°
対地高度	300 ~ 2000m
飛行速度(プラットフォームに依存)	60 ~ 250km/h
レーザ波長	1064nm(Nd:YVO ₄)
レーザ強度	クラス4

ある特長を持つ。計測仕様を表-1に示す。計測精度は平面座標で対地高度の1/2000（本計測では対地高度が600mなので約 $\pm 30\text{cm}$ ）、標高で約 $\pm 15\text{cm}$ である。高さ精度はレーザスキャナの精度に依存するため不変である。

(2) 調査の概要

調査対象領域は、北海道札幌市内を流れる豊平川（一級河川石狩川水系）上流の支川小樽内川に位置する定山溪ダム流域（流域面積104km²）内の10km²、標高約550m～1300mの区域である（図-1）。区域西側には朝里岳（標高1281m）の頂を含む稜線が南北に走り、そこから東に向かって中緩斜面が広がっている。区域東側には白井岳（標高1301m）の稜線が南北方向に連なっている。区域の多くはエゾマツ・ダケカンバ群落等の針広混交林、ササ・ダケカンバ群落に覆われている。朝里岳山頂付近にはササ自然草原や雪田草原が広がる。また域内北部にはスキー場が併設されている。

航空レーザ測量は初期条件を得るため積雪前と想定された2008年10月31日に行った。この日は近隣の気象観測露場（標高400m）に設置したレーザ積雪深計によると、根雪の20日前であり、植生の繁茂は少なく地表面計測への影響は小さいと考えられた。一方、積雪最盛期のデータを得るため2009年3月8日に再度航空レーザ測量を行っ

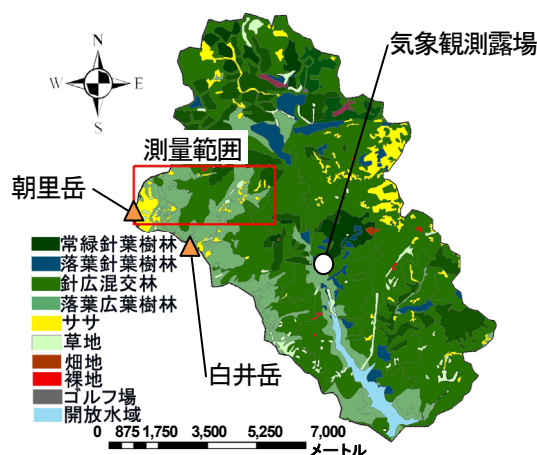


図-1 定山溪ダム流域および測量範囲

現存植生図（第5回）「環境省生物多様性センター」運営の「生物多様性情報システム」から引用

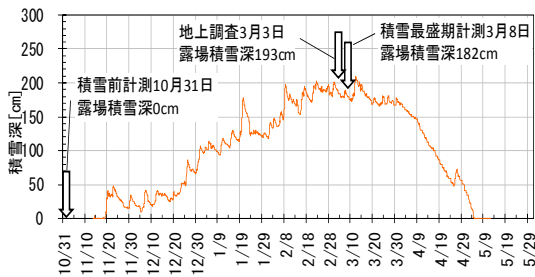


図-2 気象観測露場における観測値と計測日

た．気象観測露場に設置したレーザ積雪深計によると，測量時の積雪深は1.82mで概ね最盛期の雪面標高データを取得できたものと思われる（図-2）．

この他に，計測範囲内のスキー場の協力を得て9点において地上GPS測量（VRS）（セット間較差の許容範囲は座標値で2cm以内，高さで3cm以内）を実施して各点の積雪深を求め，実測による検証値とした．

3. データの検証

(1) 計測値の精度検証

航空レーザ測量の精度は表-1に示した通りであるが，積雪面の計測精度を確認するため積雪前，積雪最盛期のそれぞれについて水平位置検証として建物等の検証物をもとに相対座標精度検証を行った．標高精度検証としてGPS測量による地上基準点を用いた検証を行いそれぞれ測定精度の範囲内であることを確認した．

(2) 現地での積雪深観測結果との比較

次に積雪最盛期の航空レーザ測量と同時期に地上GPS測量を行い，航空レーザ測量データと比較した．本来同時刻に両観測を実施すべきであるが，地上調査は多くの時間を必要とするため比較的安定した気象条件下で行う必要がある．一方航空レーザ測量は短時間の計測が可能だが，低空に雲が発達すると観測することが出来ない．このような中でそれぞれ積雪最盛期において最も適切に観測が行える時期を判断して観測を行った．

地上調査は気象観測露場の積雪深や気象予報から判断し，3月3日に実施した．調査ポイントの選定に当たって観測点の標高の間隔が概ね均等になるように配慮した．また，なるべく起伏の少ない平坦な場所を選ぶとともにGPS測量が可能によく開けた場所を選定した．調査範囲は図-3に示すとおり，観測点を中心とした四方とし，1地点当たり合計5箇所の座標と標高を計測した．

結果を表-2に示す．航空レーザ計測データについては，ランダムに分布している生データと1mメッシュの格子点の空間的な距離の相関をとって内挿処理を施し，1mメッシュのDEMを作成した．この二時期のDEMを基に，地上調査の観測点における標高値を差分し積雪深とした．地上調査データは，各観測点の積雪深及び5箇所の平均

雪面標高である．航空レーザ測量実施日と地上調査日との間に5日間の較差が生じている．そこで，それぞれの雪面標高の較差を求め補正量とした．レーザスキャナ自身の持つ標高の精度は $\pm 15\text{cm}$ であり，積雪深は二時期の標高の差分から求まる．したがって，精度は差分 \pm 誤差の自乗平方和($\pm 21\text{cm}$)となる．補正量についてはおよそ誤差範囲に収まっており，航空レーザスキャナの性能とほぼ一致した．よって，補正量を加え地上GPS測量に基づく実測積雪深と航空レーザ測量を比較したところ誤差の範囲は $-0.72\text{m} \sim -0.12\text{m}$ ，誤差平均値は -0.46m となり，誤差は全て負の値を示した（表-3）．特に標高750m以上で誤差が大きくなっている．そこで消雪後に積雪深の観測地点で改めて地上GPS測量を行い，確認する事とした．しかし，現地はササなどが激しく密集しており，観測点まで到達できない箇所もあり，スキー場のコース内に設置した基準点と観測点の間に単点を設け，ササ地内の標高を点検することとした．再度計測した地盤高と航空レーザ測量による地盤高データとの較差の比較を図-4に示す．標高値に対する誤差の相関が顕著に表

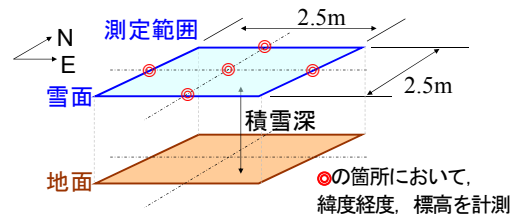


図-3 地上調査方法

表-2 地上調査と航空レーザ測量による積雪深の比較

点名	レーザ計測データ			地上調査データ(09/3/3)補正後		
	雪面標高(m) (09/3/8)	地盤標高(m) (08/10/31)	積雪深(m)	計測日間 補正量(m)	雪面標高(m)	積雪深(m)
1	1,051.39	1,047.80	3.60	-0.22	1,051.39	4.32
平均	1,051.40	1,047.79	3.61		1,051.40	4.52
3	990.99	986.74	4.25	0.00	990.99	4.81
平均	990.99	986.77	4.22		990.97	4.83
4	836.68	860.14	3.54	-0.13	863.67	4.22
平均	863.67	860.12	3.55		863.67	4.39
5	799.20	796.43	2.77	-0.25	799.17	3.23
平均	799.19	796.42	2.78		799.19	3.45
6	751.68	748.73	2.96	-0.15	751.65	3.60
平均	751.67	748.73	2.94		751.67	3.68
7	720.34	717.69	2.65	-0.30	720.27	2.77
平均	720.33	717.68	2.64		720.33	3.09
8	713.39	710.71	2.67	-0.14	713.38	3.04
平均	713.39	710.73	2.66		713.38	3.21
9	650.35	647.43	2.92	-0.20	650.38	3.35
平均	650.33	647.51	2.82		650.33	3.32
10	636.89	634.29	2.60	-0.12	636.86	2.81
平均	636.87	634.28	2.60		636.88	2.86

表-3 地盤高較差の補正前後の積雪深の比較

点名	レーザ測量		地上調査 積雪深(m)	補正前の 積雪深 較差(m)	補正後の 積雪深 較差(m)
	補正前の 積雪深(m)	補正後の 積雪深(m)			
1	3.60	3.93	4.32	-0.72	-0.39
3	4.25	4.54	4.81	-0.56	-0.27
4	3.54	3.73	4.22	-0.68	-0.49
5	2.77	2.91	3.23	-0.46	-0.32
6	2.96	3.05	3.60	-0.64	-0.55
7	2.65	2.72	2.77	-0.12	-0.05
8	2.67	2.74	3.04	-0.37	-0.30
9	2.92	2.93	3.35	-0.43	-0.42
10	2.60	2.60	2.81	-0.21	-0.21
			平均値	-0.46	-0.33

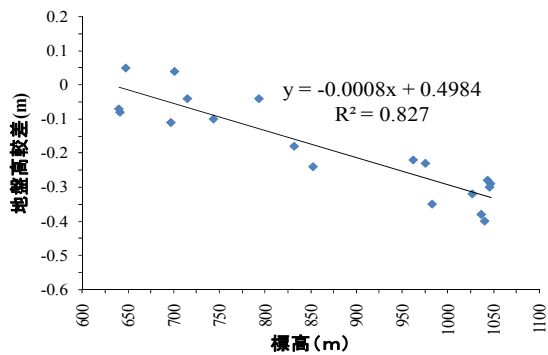


図-4 地盤高較差の標高相関

れた。計測時に撮影した映像からも山頂近傍に積雪が認められることや、航空レーザ測量のシステム上このような相関は生じないことから、この較差は積雪によるものと考えられた。そこで標高と測量地盤高の較差の相関をとり、積雪前の標高値を内挿した1mメッシュデータについて補正した。結果を表-3に示す。補正後の地上調査データとの較差は平均で-0.33mと低減し概ね誤差が解消された。残る誤差はササなどの植生の密集度合いや積雪によるササの倒れ込みなどの影響が考えられる。今回、環境省の現存植生図¹²⁾を基に、簡易的に地上調査地点で誤差の評価を試みたが、ササ地とトドマツ植林地などの植生の違いによる誤差の判定は出来ていない。今後、新たに無積雪時のDEMを取得するなどして確認する必要がある。

4. 積雪深の分布特性

航空レーザ測量によって得られた地表面と積雪表面の生データを用い、1mメッシュと同様な内挿処理を施し、2m、5m、10m、50mの各メッシュデータを作成した。これを各格子点毎に高さの差分をとり図-5のような積雪深分布図（範囲は図-1参照）を作成した。2mメッシュにおいて積雪深が0または負の領域が尾根の一部で認められた。しかし5mメッシュ以上では発生していないことから、ごく微小領域での計測誤差であると考えられる。一方朝里岳の東側の谷底部で10mを超える積雪が計測されており、吹きだまりや雪崩によるものと考えられる。

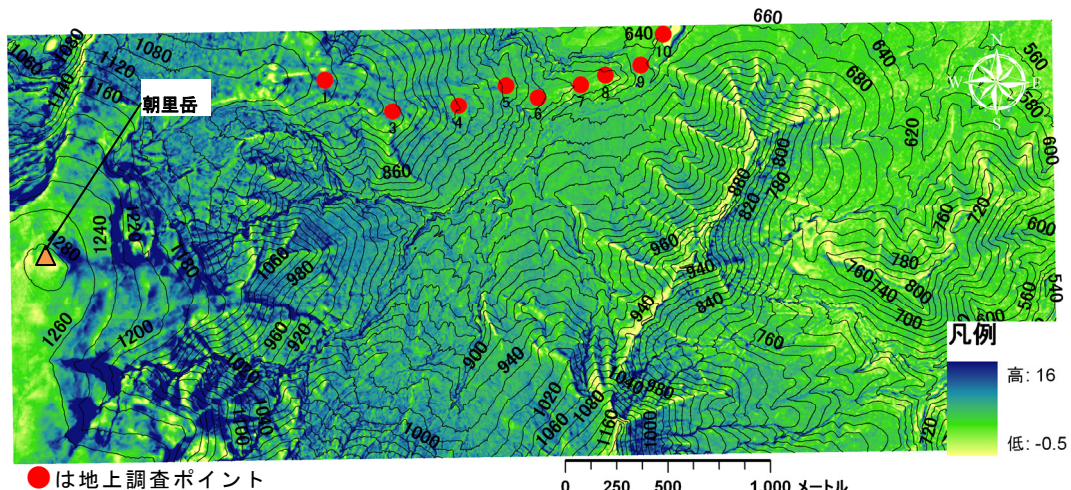


図-5 航空レーザ測量による積雪深分布（2mメッシュ）

次に今回の計測で得られたメッシュデータを基にメッシュスケールの違いと地形因子との関係について分析を行う。ここでは積雪深と相関があると思われる標高、傾斜度、斜面曲率、斜面方位の4つの地形因子について関係を調べた。

(1) 標高との相関

最も高い相関となったのは従来から指摘されている標高である。ただし、図-6のとおりメッシュが細くなる程データのバラツキが大きく相関が低くなる傾向にあることから、大地形的なスケールによる影響が大きくなる一方、10mメッシュ以下の小さなスケールにおいては他の因子の影響が強くなる傾向にある。

(2) 傾斜度・斜面曲率との相関

傾斜度は各メッシュの水平面からの傾きの最急勾配を示す。斜面曲率は地形の凹凸の指標として用いられるもので、曲面上のある点を通る全ての測地線の曲率の最大値と最小値の平均として定義される。0は平坦、正が谷底地形、負が尾根地形であることを示す¹³⁾。傾斜度・斜面曲率の相関は低い。ただし、図-6のとおり斜面曲率に関して大地形的なスケールでは平滑化されてしまい相関が見いだされなかったが、5m、10mメッシュでは積雪深が尾根部で小さく、谷底部で大きくなる傾向が顕著に表れた。2mメッシュではデータのバラツキが大きく相関は見られなかった。

(3) 斜面方位との相関

斜面方位に関しては西風の季節風に伴い、図-5、図-6にも表れているように尾根の西側で雪が吹き飛ばされ、東側では雪底となっていることがわかる。融雪の過程では日射が卓越し、南斜面の融雪が進む¹⁴⁾ことから積雪深が少なくなることが考えられるが、対象領域における積雪の過程では島村ら¹⁵⁾が指摘しているように、季節風の影響が卓越していることが示された。また、当該領域の斜面方位の2mメッシュ(50mメッシュ)のデータ数が北36%(38%)、東39%(45%)と多く、西11%(8%)、南13%(9%)と少なく、バラツキがみられた。

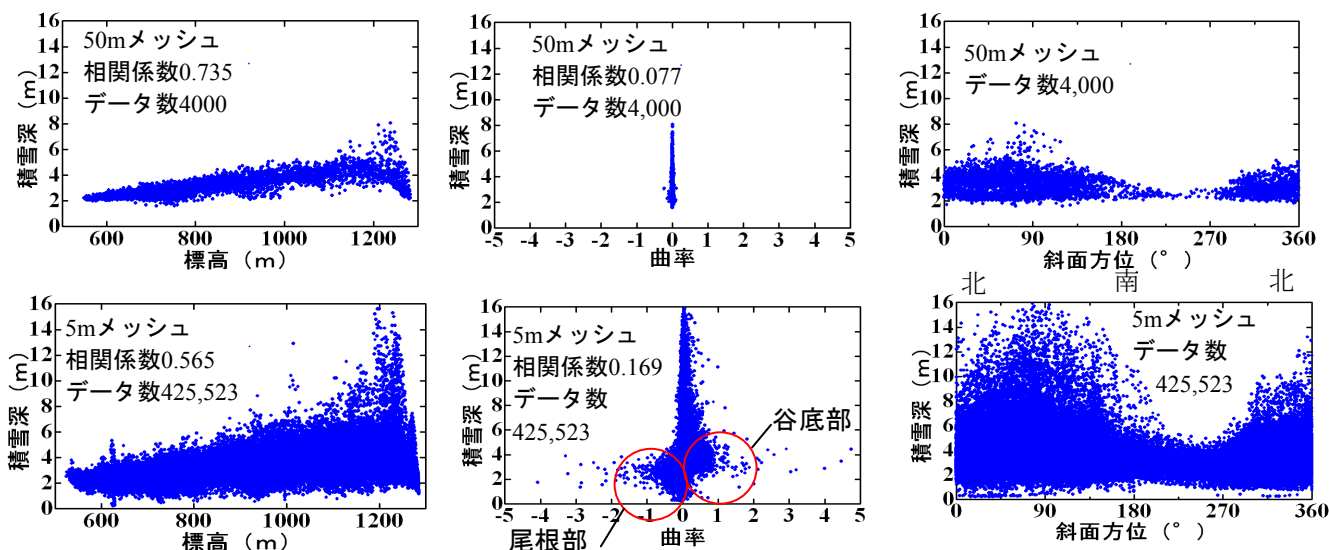


図-6 メッシュの違いによる積雪深と地形因子の関係

5. 積雪深の分布の推定

大地形的データ(50mメッシュ)、微地形データ(5mメッシュ)を用いてスケールの違いによる積雪深の分布について考察する。前章より、斜面方位のデータ数にバラツキがあることから、方位毎にデータを分けて推定を行う。さらに微地形データについては、斜面曲率において尾根部と谷底部で、積雪深分布の違いが見られたことから斜面曲率を考慮する。

以上の事を考慮し、次の重回帰式を仮定した。

$$H = \alpha Z + \beta \quad (1a)$$

$$H = \alpha Z + \beta Cr + \gamma \quad (1b)$$

ここで H : 積雪深[m], Z : 標高[m], Cr : 斜面曲率を示す。式(1a)が50mメッシュ、式(1b)が5mメッシュの重回帰式で、表-4に得られた回帰係数 α , β , γ を示す。また、図-7にメッシュ毎の計測値と重回帰式から推定された積雪深分布の一例を示す。50mメッシュは再現できているが、5mメッシュは積雪深が5mを超える辺りで再現が悪い。島村ら¹⁵⁾が指摘するように、森林限界より高い標高帯で風による積雪の移動等が考えられることから、今後の検討課題としたい。なお、5mを超える地帯の積雪量(m^3)を求めたところ、全体に占める割合は50mメッシュで4%程度、5mメッシュで9%程度と増加しており、メッシュを細分化する事で、積雪分布を精度良く抽出できており、微地形データの有用性が示された。

次に、定山溪ダム流域内の積雪深空間分布を推定する。なお、流域内の標高の空間分布を知る必要があるが、ここでは基盤情報として、国土地理院のホームページで公開されている国土数値情報標準地域メッシュの第1次区画を用いた。なお、DEMのメッシュサイズは50mである。次にGISを用いてメッシュ毎の標高、斜面方位を求め、式(1a)に代入し積雪深を求めた。結果を図-8に示す。この結果を用いて積雪相当水量を算定する。積雪相当水量を算定するうえで、積雪密度の空間分布を把握する必要がある。島谷部ら¹⁶⁾による既往データの解析から、

当該流域における融雪期の積雪密度は、空間的にあまり変化しないことが示されている。ダムでは包蔵水量を把握する目的で、白井岳コースと春香山コースを流域の積雪を代表するコースとして積雪最盛期にスノーサーベイを行っている。2009年3月12日に行われた調査では、標高530mで積雪密度 $360(kg/m^3)$ 、標高850mで積雪密度 $390(kg/m^3)$ でありほぼ一様である。また気象観測露場の積雪重量と積雪深から求めた1時間毎の積雪密度は $385 \sim 408(kg/m^3)$ でスノーサーベイの結果とほぼ等しいことから、3月8日の気象観測露場の値を用いた。結果を表-5に示す。積雪相当水量との比較において概ね同等の結果が得られており、本手法の有効性が確かめられた。

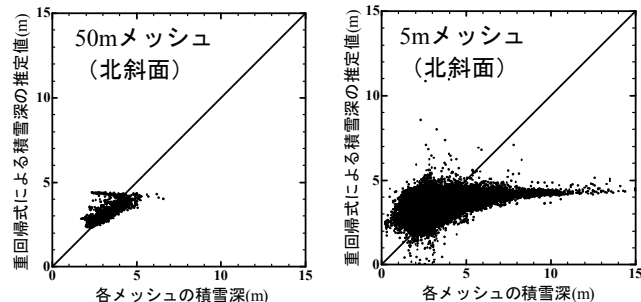


図-7 実測積雪深と回帰式による推定積雪深

表-4 回帰係数一覧

	50mメッシュ			5mメッシュ			
	α	β	相関係数	α	β	γ	重相関係数
東	0.004	0.164	0.806	0.004	2.815	0.076	0.660
西	0.002	1.346	0.488	0.001	1.771	1.732	0.346
南	0.002	1.516	0.547	0.002	2.599	1.196	0.520
北	0.003	0.742	0.725	0.003	2.729	0.737	0.601

表-5 積雪相当水量の推定結果

対象面積(km^2)	104
気象観測露場における積雪密度(kg/m^3)	422
スノーサーベイによる推定積雪相当水量(mm)	1159
積雪深回帰式による推定積雪相当水量(mm)	1134
積雪深回帰式による推定積雪包蔵水量($\times 10^6 m^3$)	118

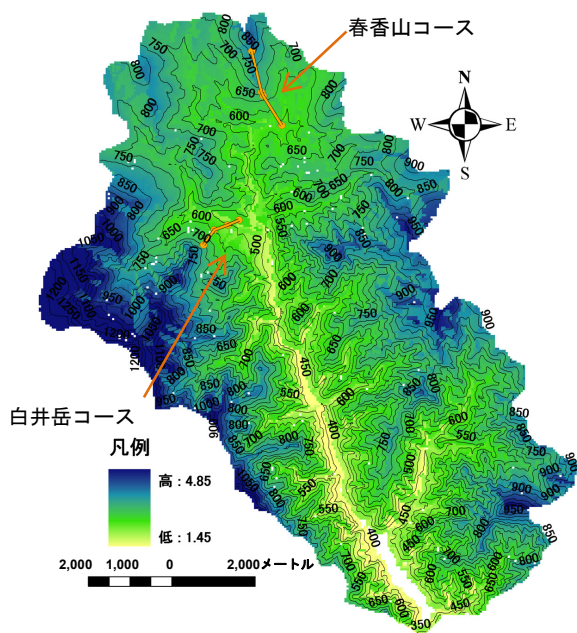


図-8 50mメッシュ値を用いた回帰式によるダム流域の推定積雪深

6. おわりに

今回、航空レーザ測量成果を基に、最盛期の積雪深分布におけるメッシュスケールの違いについて比較検討した結果、以下の事が明らかとなった。

(1)地形因子と積雪深の空間分布特性を分析した結果、大地形的には標高との高い相関が認められる結果となった。一方、微地形的には標高との相関が小さくなり、尾根部並びに谷底部では斜面曲率の影響が強くなった。

(2)斜面方位毎に地形因子を変数とした回帰式を提案し、積雪重量の連続観測結果から得た積雪密度を用いたことで最盛期の流域平均積雪相当水量を推定した。

近年、リモートセンシング技術の進展に伴い、地形規模の詳細地形情報が公開され、手軽に入手することが可能となって来ている。今後は、今回得られた知見を基に、経年的な傾向を把握するとともに汎用性の高いメッシュデータによる実用的な評価手法について検討していきたい。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、北海道開発局石狩川開発建設部豊平川ダム統合管理事務所から観測場所の提供を受けるなど多大な協力を頂いた。一般財団法人日本気象協会の齋藤正美氏、臼谷友秀氏には、地上調査に関する技術的検討ならびに調査を担当して頂いた。朝日航洋株式会社の中島保氏、吉田剛氏をはじめとするスタッフの方々には、航空測量技術等卓越した技術を要する調査を遂行して頂いた。

査読者からは、原稿を改良するのに役立つ貴重なコメントを頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Stanley S. Butler: Engineering Hydrology, Prentice-Hall, Inc. Press, P.34, 1957.
- 2) 菅谷重二: 大雪山積雪水量及び流出調査, 経済安定本部資源委員会・北海道庁土木部報告書, 1949.
- 3) 長谷川茂, 小林伸行: 桂沢ダム流域の融雪流出の予知, 北海道開発局土木試験所月報, pp.6-1~6-41, 1974.
- 4) 山口甲, 長谷川茂: 融雪流出の予知に関する研究, 北海道開発局土木試験所報告, 64, 1975.
- 5) 山田知充, 西村寛, 水津重雄, 若浜五郎: 大雪山旭岳西斜面における積雪の分布と堆積・融雪過程, 低温科学, 物理篇, 37, pp1-12, 1978.
- 6) 水津重雄, 山田知充, 若浜五郎: 手稲山における積雪の堆積と雪質の変化, 低温科学, 物理篇, 37, pp47-54, 1978.
- 7) 松山洋: 日本の山岳地域における積雪水当量の高度分布に関する研究について, 水文・水資源学会誌, 第11巻2号, pp164-174, 1998.
- 8) 丸安隆和, 内田正人, 田浦秀春: 航空写真による積雪分布および積雪量の解析方法に関する研究, 土木学会論文集, 153, pp41-54, 1968.
- 9) Hopkinson C., Sitar M., Chasmer L., Gynan C., Agro D., Enter R., Foster J., Heelsi N., Hoffman C., Nillson J., Pierre S R.: Mapping the Spatial Distribution of Snowpack Depth Beneath a Variable Forest Canopy Using Airborne Laser Altimetry, Proceedings of the 58th Annual Eastern Snow Conference, Ottawa, Ontario, Canada, pp253-264, 2001.
- 10) 岡本隆, 黒川潮, 松浦純生, 浅野志穂, 松山康治: 山地の積雪深分布計測における航空レーザスキャナの適用性に関する検討, 水文・水資源学会誌, 第17巻5号, pp529-535, 2004.
- 11) 武田要, 高橋裕: LANDSAT雪線情報と積算暖度法による流域最大積雪水量算定に関する研究, 土木学会論文集, 311, pp81-92, 1981.
- 12) 現存植生図 (第5回), 環境省生物多様性センター, 生物多様性情報システム
- 13) 西田顕郎, 小橋澄治, 水山高久: 数値地形モデルに基づく地震時山腹崩壊斜面の地形解析, 砂防学会誌, Vol49, No.6, pp9-16, 1997.
- 14) 小野延雄, 石川信敬, 新井 正, 若土正暁, 青田昌秋: 基礎雪氷学講座VI, 雪氷水文現象, p55, 1994.
- 15) 島村雄一, 泉岳樹, 松山洋: スノーサーベイとリモートセンシングに基づく山地積雪水資源量の推定—新潟県上越国境周辺を事例に一, 水文・水資源学会誌, 第18巻4号, pp411-423, 2005.
- 16) 鳥谷部寿人, 山下彰司, 新目竜一: 積雪重量計を用いた融雪観測と積雪相当水量に関する一考察, 土木学会北海道支部年次技術発表会論文集 第65号 B-32 2009.

(2009. 9. 30受付)